



Étude Be-Drain sur le béton drainant: de la fondation à la couche de roulement

Les objectifs et les premiers résultats du projet de recherche prénormatif Be-Drain ont été présentés dans la Newsletter CRR 4 (Boonen et al., 2021). Maintenant que le projet est officiellement terminé, cet article vise à en résumer les principales conclusions ainsi qu'à donner un aperçu des propositions de directives techniques qui en découlent, afin d'assurer des revêtements routiers durables en béton drainant coulé sur place, maigre ou non.



Figure 1 – Mise en oeuvre récente de compositions de béton drainant sur des planches d'essais à Sint-Niklaas, en collaboration avec Aquafin et Holcim

Pour rappel: le contexte

Dans le cadre de l'appel de plus en plus pressant en faveur d'une gestion plus intégrale des eaux en environnement urbain, le projet Be-Drain avait pour objectifs d'établir des directives techniques, des caractéristiques performantielles et des méthodes d'essai adaptées pour le béton dit drainant ou poreux utilisé dans les structures routières comme fondation ou comme revêtement routier (= couche de roulement) du double fait de:

1. l'intérêt et la demande croissant(e) pour les revêtements routiers perméables, notamment le béton poreux coulé sur place, pour lesquels il n'existe encore aucune prescription technique générale en Belgique à l'heure actuelle;
2. la nécessité d'une méthode de compactage en laboratoire représentative pour le béton maigre drainant utilisé comme fondation routière, et ce dans le cadre de la certification (Organisme impartial de contrôle de produits pour la construction [COPRO], 2019) (Commission sectorielle «Mélanges traités aux liants hydrauliques» de COPRO).

Pour traiter ces deux sujets similaires, le CRR (en collaboration avec le CRIC-OCCN) a dû mener une étude plus approfondie. Cela nous a permis d'approfondir nos connaissances sur ces mélanges de béton poreux, également en vue d'adaptations futures des cahiers des charges types belges pour la construction routière. Cette étude approfondie s'est déroulée à la fois en laboratoire et par le biais d'un suivi de quelques chantiers avec application de béton drainant, afin de valider les résultats obtenus en laboratoire.

Étude en laboratoire

Optimisation de l'étude en laboratoire

L'objectif de cette tâche était tout d'abord de mettre au point une **méthode de compactage représentative** en laboratoire pour les deux types de mélanges de béton poreux, et ce en fonction de la méthode de compactage sur le chantier (avec plaque vibrante – rouleau de compactage – *roller striker*, etc.). Une telle méthode de laboratoire permettrait ainsi de fixer des exigences en fonction de l'application (compromis entre la perméabilité k et la résistance à la compression R_c) et de vérifier les performances des mélanges envisagés (Boonen et al., 2021). Différentes méthodes de compactage (Proctor – table vibrante – marteau vibrant – cubes, etc.) ont été comparées en laboratoire afin de se rapprocher au maximum des conditions de mise en oeuvre sur le chantier.

À cette fin, le CRR a étudié, par exemple, l'influence de la teneur en eau sur l'ouvrabilité /fluidité du béton poreux à l'état frais en déterminant les «courbes Proctor» des mélanges (figure 2). En effet, suite aux essais réalisés la méthode de laboratoire la plus prometteuse semble être le «Proctor allégé» (selon une adaptation de la NBN EN 13286-2 [Bureau de Normalisation (NBN), 2010]), avec:

- compactage en deux couches;
- masse de 2,5 kg;
- hauteur de chute $H_c = 305$ mm;
- 56 impacts/couche;
- moule Proctor B d'un diamètre approximatif de 150 mm et d'une hauteur approximative de 120 mm.

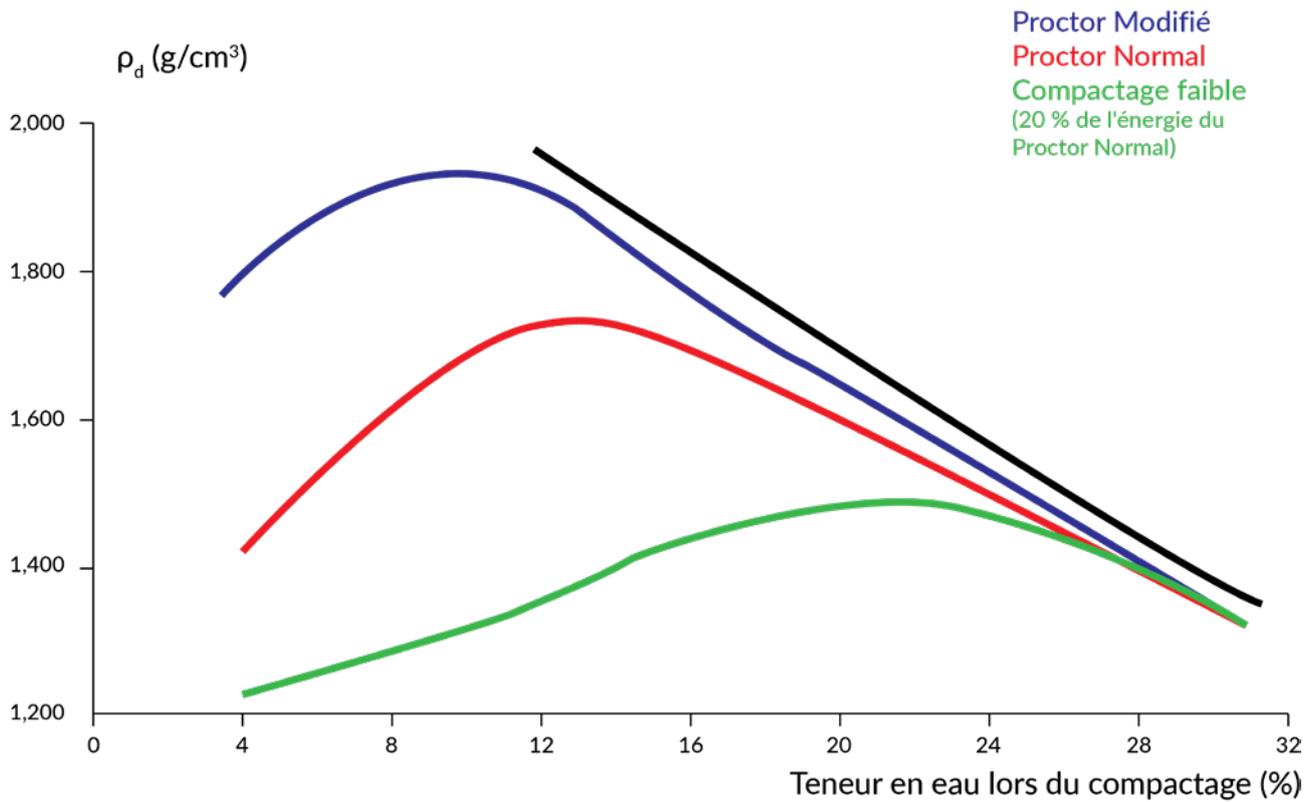


Figure 2 – Matériel de compactage Proctor et exemple de courbes Proctor



Il est important de prélever des carottes de 113 mm de diamètre dans les éprouvettes Proctor réalisées afin d'obtenir des mesures de perméabilité fiables (Boonen et al., 2022). De cette manière, la perméabilité à l'eau et la résistance mécanique (k vs R_c) peuvent être contrôlées pour différentes compositions de béton poreux, et l'influence de la teneur en eau sur le compactage et sur le taux de compactage (théorique) maximal réalisable (optimum «Proctor allégé») peut être vérifiée. Le CRR a ainsi procédé à l'optimisation en laboratoire de différents mélanges (Boonen et al., 2021) et a vérifié l'influence de plusieurs paramètres, comme l'illustre l'exemple à la figure 3 d'une composition pour une couche de roulement en béton drainant (composition 1).

Composition 1
 480 kg calcaire 10/14
 480 kg calcaire 6/10
 480 kg calcaire 4/6
 250 kg CEM III/A 42,5 N LA

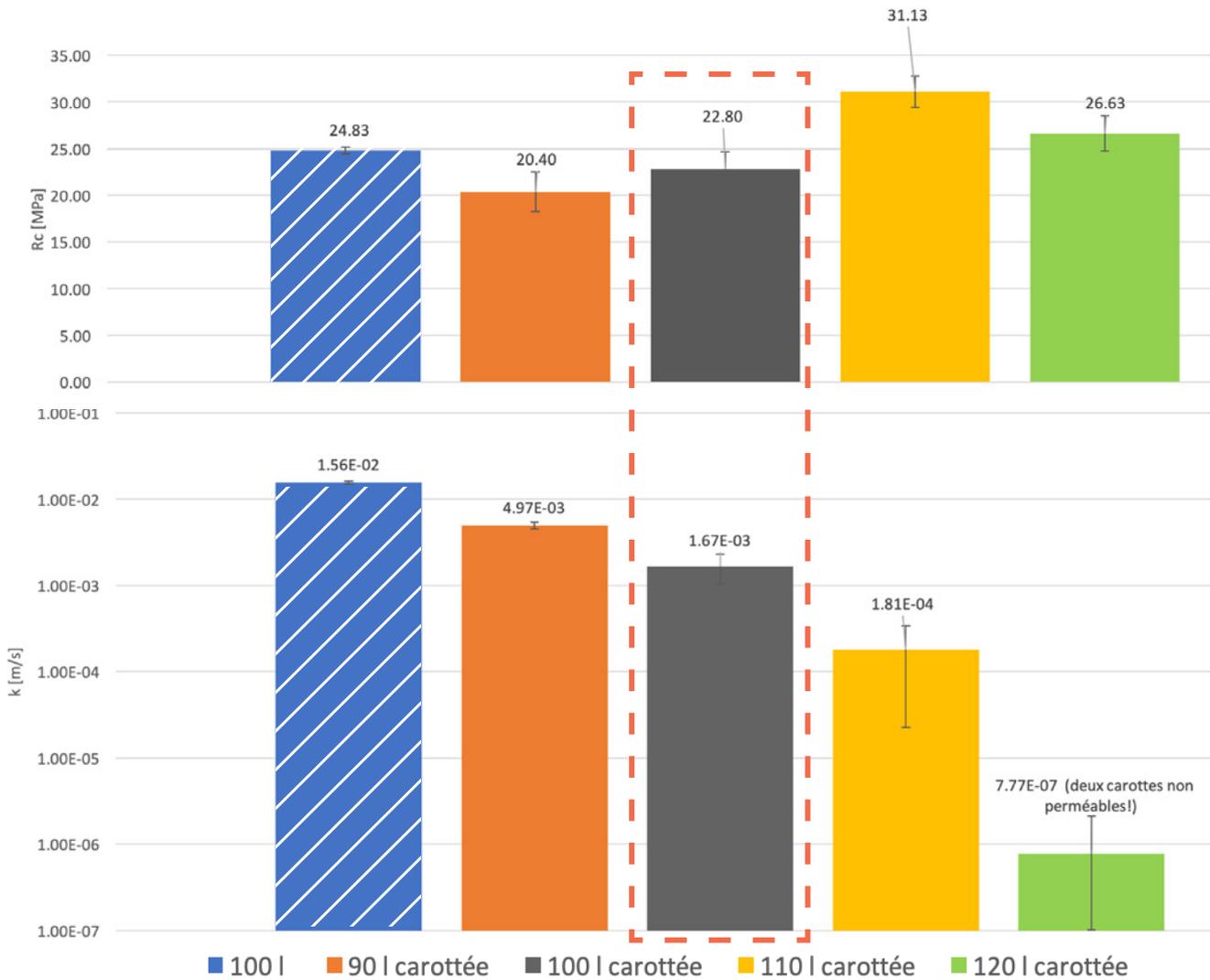


Figure 3 – Influence de la teneur en eau sur les résultats de résistance mécanique (R_c) et de perméabilité (k) en laboratoire, avec compactage Proctor «allégé» pour la composition 1 selon Boonen et al. (2021)

Pour ce cas particulier, il s'avère que l'on atteint un optimum pour la résistance à la compression à 110 litres d'eau, tandis que la perméabilité diminue systématiquement avec l'augmentation de la teneur en eau. Globalement, pour cette composition (composition 1), un bon compromis est obtenu à 100 l d'eau avec:

- résistance à la compression moyenne $R_c \geq 20$ MPa;
- perméabilité à l'eau moyenne $k \geq 4 \cdot 10^{-4}$ m/s.

Des résultats similaires ont également été obtenus pour d'autres mélanges (Boonen et al., 2022).

Ouvrabilité/fluidité

En plus des essais sur le béton poreux durci, des mesures ont également été effectuées sur le matériau à l'état frais afin de déterminer la consistance et le délai de maniabilité, qui sont importants dans la pratique pour la mise en oeuvre.

L'étude a montré qu'il est préférable de déterminer **l'ouvrabilité** du béton drainant à l'état frais par la mesure de l'**Indice de serrage (Waltz)** (NBN, 2019), en utilisant un poids de 12 kg pour obtenir des résultats avec une meilleure répétabilité et reproductibilité dans le temps (Boonen et al., 2022), comme illustré à la figure 4. Une valeur plus élevée de l'indice de serrage indique donc un béton plus sec et plus «terre humide».

En outre, on a également essayé de vérifier le **délai de maniabilité** (= le temps disponible entre la fin du malaxage et la prise du mélange) en effectuant ce que l'on appelle un essai «**Proctor différé**» (Boonen et al., 2021; NBN, 2004) en utilisant le compactage Proctor «allégé» à différents moments après la confection du mélange de béton poreux.

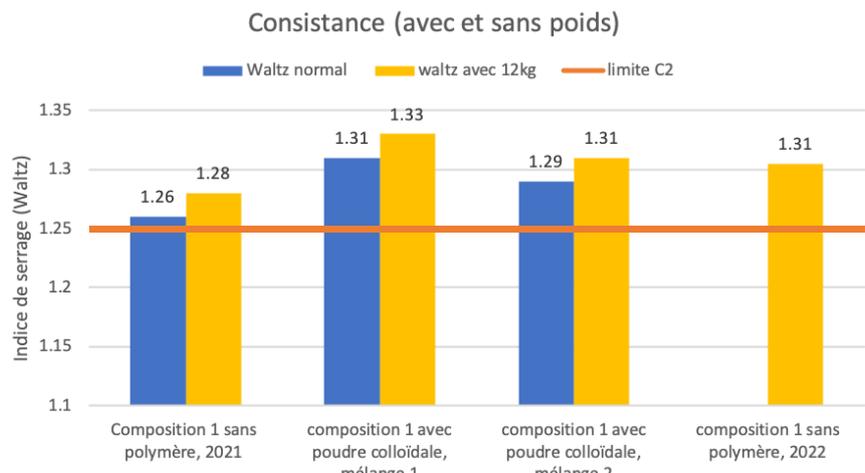


Figure 4 – Essais pour déterminer l'ouvrabilité du béton poreux avec «l'essai Waltz» modifié et l'effet d'une poudre colloïdale (composition 1)

Le délai de maniabilité (W_{pc}) est défini comme le temps au bout duquel on observe une diminution de 2 % de la masse volumique sèche du béton poreux compacté par rapport à un mélange compacté immédiatement (figure 5). Ces mesures montrent qu'il est en effet tout à fait possible de faire une estimation du temps relatif disponible pour la mise en œuvre (par exemple 1 heure et 28 minutes pour la composition 2) qui semble réaliste et représentative des observations du terrain.

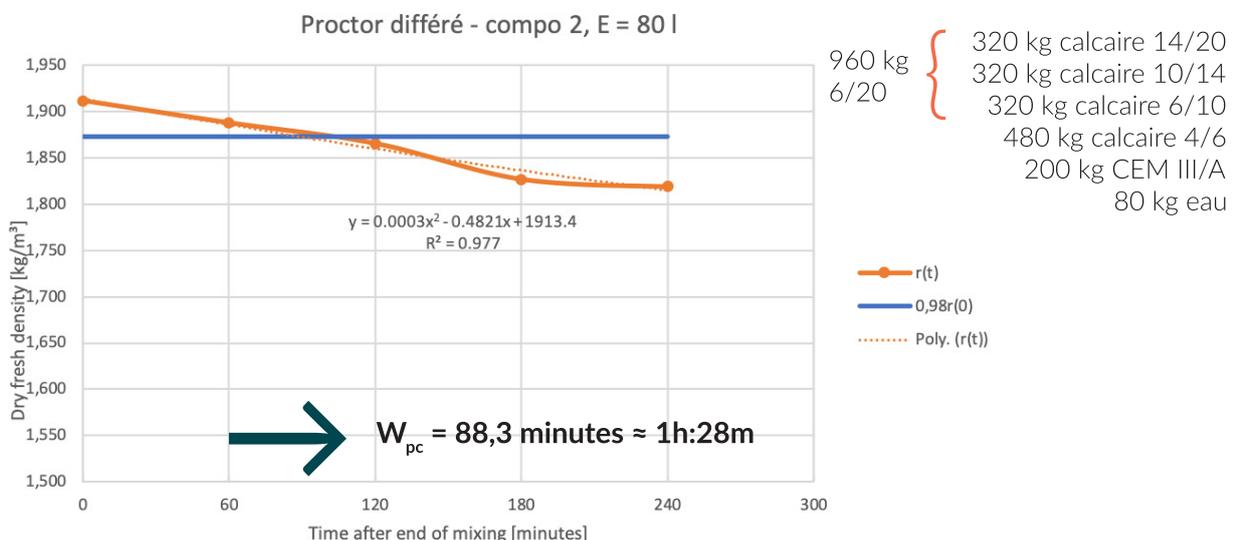


Figure 5 – Détermination du délai de maniabilité selon la norme NBN EN 13286-45 (NBN, 2004) («Proctor différé», composition 2)

En outre, on a examiné **l'effet de certains adjuvants** (retardateurs, plastifiants, etc.) et/ou d'additifs polymères (figure 4), utilisés dans la pratique, sur la fluidité et le délai de maniabilité. Il apparaît que l'effet de ces adjuvants n'est pas univoque et semble dépendre à la fois de la composition du béton poreux testé et du dosage utilisé (tableau 1). La méthode de détermination du délai de maniabilité (Proctor différé) doit donc être examinée au **cas par cas** et est également très sensible aux petites fluctuations de la masse volumique des différents mélanges.

Délai de maniabilité [minutes]	Sans adjuvant	Avec retardateur de prise	Avec plastifiant
Composition 1	132,5	101,6	131,4
Composition 2	109,2	233,4	-
Composition 4	88,3	-	74,9

Tableau 1 - Influence du retardateur de prise ou du plastifiant sur le délai de maniabilité calculé des mélanges de béton poreux (composition 1, 2 ou 4)

Influence des additifs polymères

L'influence de certains additifs polymères (dispersion de polymères ou poudres colloïdales) a été étudiée au niveau des propriétés du béton frais (voir plus haut), mais également au niveau des performances du béton durci. Après une première phase, les essais ont été menés avec la poudre colloïdale uniquement car l'additif sous forme de dispersion liquide polymère n'était plus commercialisé.

L'effet de cette poudre colloïdale (à ajouter à raison de 1 kg/m³ en même temps que le ciment) a été étudié, tant au niveau des exigences performantielles (résistance vs perméabilité et porosité, exemple à la figure 6) que des exigences plus fonctionnelles telles que la résistance au gel-dégel ou la résistance au plumage (voir plus bas).

La figure 6 montre, par exemple, **l'effet positif de la poudre colloïdale** sur la résistance mécanique (en termes de résistance à la compression R_c et de résistance à la traction par fendage $R_{t,sp}$), tandis que la porosité accessible à l'eau et la perméabilité (k) diminuent légèrement, mais restent suffisantes.

Ceci est également lié à l'augmentation de la masse volumique observée, tandis que la fluidité du béton est aussi partiellement affectée, rendant le mélange avec la poudre colloïdale légèrement moins fluide (figure 4, à droite).

Grâce à l'augmentation de la résistance mécanique, **une valeur ajoutée potentielle** peut également être observée au niveau d'autres propriétés fonctionnelles, notamment la résistance au gel-dégel en présence de sels de déverglaçage (figure 8).

Composition 4
915 kg calcaire 6/10
460 kg calcaire 4/6
300 kg CEM III/A 42,5 N LA
105 kg eau

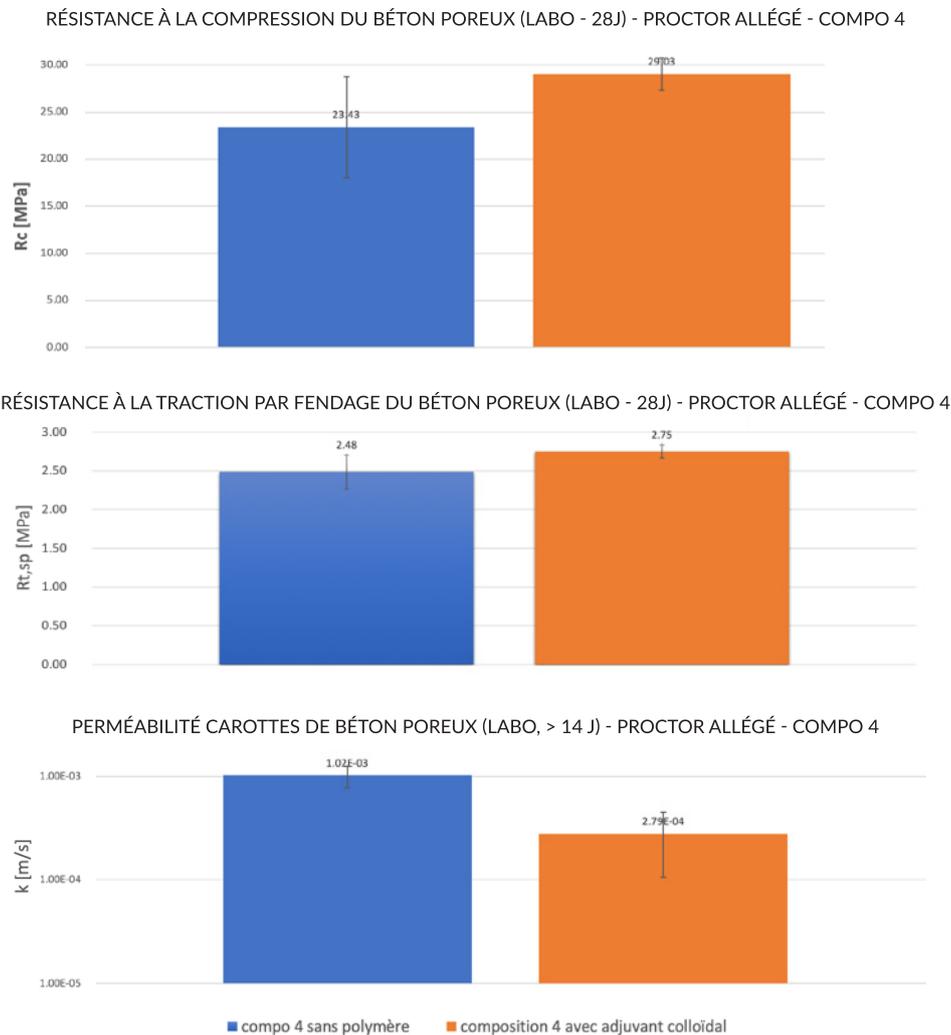


Figure 6 – Influence de l'adjuvant colloïdal sur les résultats de la résistance mécanique (R_c et $R_{t,sp}$) et de la perméabilité (k) avec le compactage Proctor «allégé» (composition 4 avec 105 l d'eau)

Propriétés fonctionnelles

Dans une autre phase de l'étude en laboratoire, d'autres exigences plus fonctionnelles et relatives à l'utilisation du matériau en tant que revêtement routier (résistance au gel-dégel, résistance au plumage, confort de conduite, etc.) ont été étudiées. Dans ce cadre, un premier élan a été donné à la mise au point d'une méthode d'essai pour déterminer la résistance aux cycles de gel-dégel en présence de sels de déverglage. En outre, des essais visant à déterminer la résistance au plumage ont également été réalisés et l'influence de l'ajout d'adjuvants polymères (poudres colloïdales) sur la résistance au gel-dégel et au plumage du béton poreux a été examinée.

Résistance au gel-dégel avec sels de déverglage

Le béton drainant peut être sensible à l'action néfaste des cycles de gel-dégel en présence de sels de déverglage (Henderson, 2012). Toutefois, pour le vérifier, il faut mettre au point une

méthode d'essai adaptée, car la méthode d'essai pour le béton conventionnel (avec une couche de solution saline sur la surface supérieure) ne peut pas être réalisée.

Dans l'étude Be-Drain, nous avons mis au point une première ébauche de méthode d'essais, basée sur l'immersion à plusieurs reprises (par exemple après 0, 7, 14, 28 ou plus de cycles), des éprouvettes cylindriques pendant un certain temps (1 minute) dans une solution saline avant une exposition à plusieurs cycles de gel-dégel selon CEN/TS12390-9 (NBN, 2016), comme illustré à la figure 7.

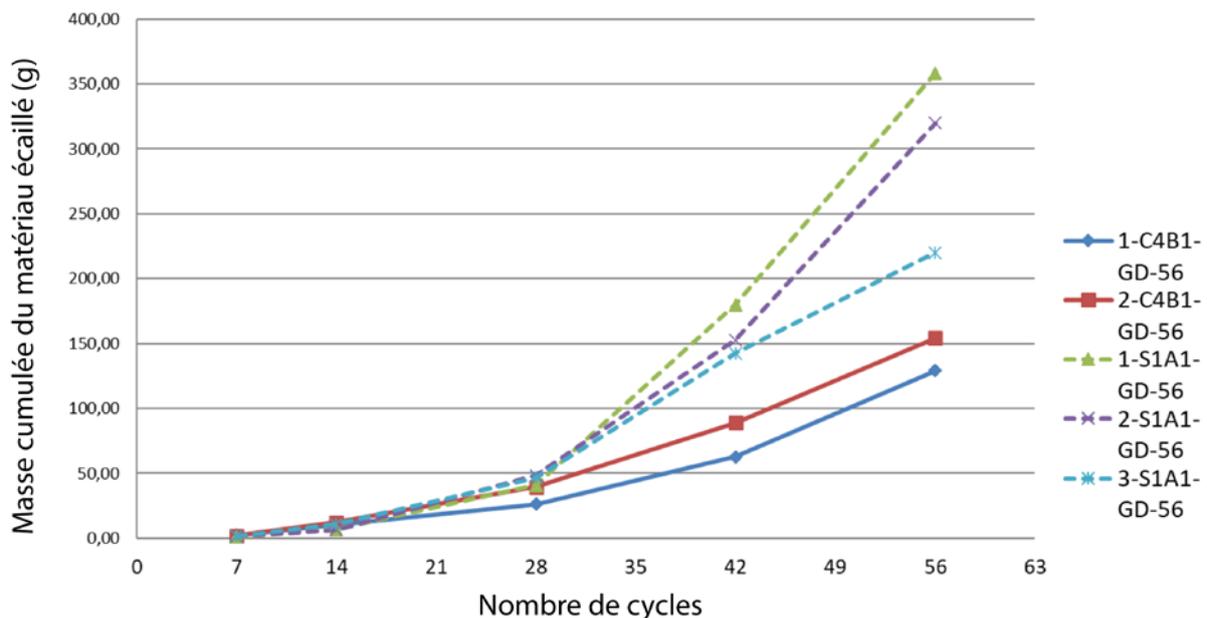
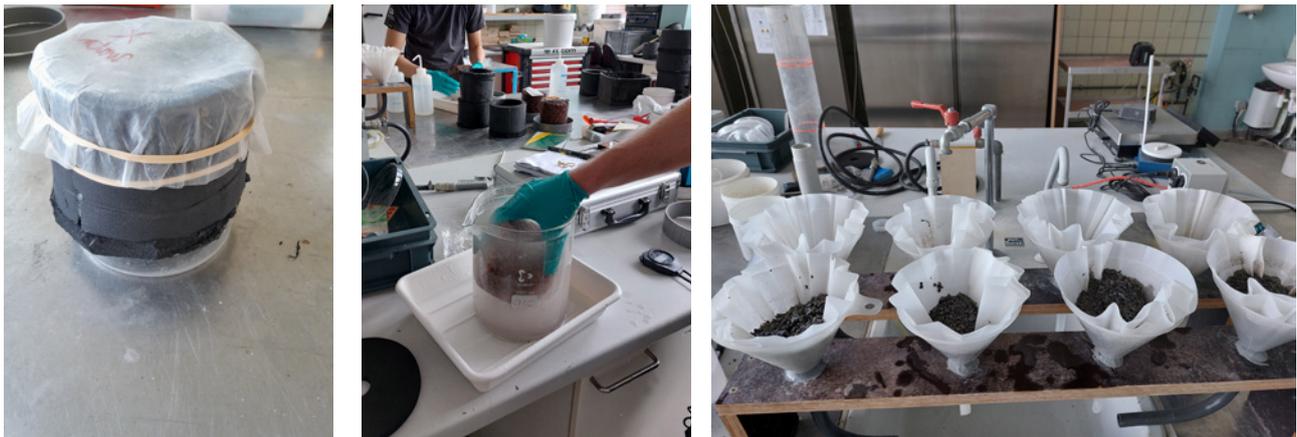


Figure 7 – Illustration de la méthode d'essai proposée pour déterminer la résistance aux cycles de gel-dégel en présence de sels de déverglaçage pour le béton poreux, et exemple de cycles d'écaillage pour la composition 1 (avec poudre colloïdale = S1A1) et la composition 4 (sans adjuvant = C4B1)

La résistance peut ainsi être déterminée par la mesure de la masse écaillée cumulée (en kg/m², figure 7 ci-dessous), ou alors par la perte de masse de la carotte sèche après les cycles de gel-dégel (en g ou en pourcentage, figure 8). En outre, la détermination de la résistance à la traction par fendage après les cycles de gel-dégel et de la perte de résistance associée peut également fournir une bonne mesure de la résistance au gel-dégel. En raison de la rigueur de cette méthode d'essai, il est indiqué d'arrêter l'essai après 28 cycles. Un résumé de quelques résultats visant à déterminer la résistance aux cycles de gel-dégel en présence de sels de déverglaçage est présenté à la figure 8, pour l'écaillage moyen (en kg/m²), la perte de masse moyenne

(en g et %), la perte moyenne de la résistance à la traction par fendage (en %) et la résistance absolue à la traction par fendage (en MPa) avant et après les cycles de gel-dégel.

Les graphes montrent clairement **l'impact positif de la poudre colloïdale** (voir plus haut) sur la résistance au gel-dégel, **mais aussi l'énorme variation** des résultats obtenus avec cette méthode d'essai pour déterminer la résistance aux cycles de gel-dégel en présence de sels de déverglaçage.

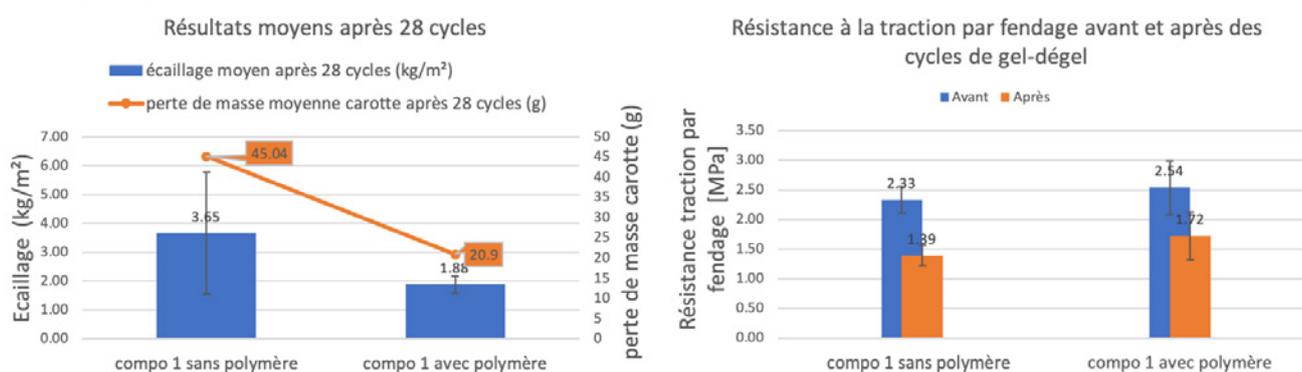


Figure 8 – Résumé des résultats de détermination de la résistance aux cycles de gel-dégel en présence de sels de déverglaçage pour la composition 1, avec et sans ajout d'adjuvant colloïdal (polymère)

En conclusion, nous pouvons dire que la recherche prénormative actuelle a permis de créer une **première ébauche de méthode d'essai** pour la détermination de la résistance au gel-dégel. Des recherches futures sont toutefois nécessaires pour **valider** cette méthodologie et éventuellement établir des limites pour la perte de masse et/ou de résistance. Cependant, on peut également se demander s'il est opportun d'appliquer trop de sels de déverglaçage sur des structures routières perméables à l'eau avec un risque d'infiltration dans le sous-sol.

Essais de plumage

Étant donné la nature ouverte du béton drainant, ce matériau peut également être plus sensible au détachement de pierres à la surface en cas de trafic tangentiel excessif. Afin de quantifier ce problème, la **résistance au plumage** a également été étudiée via une méthode d'essai prévue pour les revêtements bitumineux (annexe B de CEN/TS 12697-50 [NBN, 2018]), où les pertes de masse pour le béton poreux ont été étudiées (figure 9).

Plusieurs conditions d'essai ont été appliquées: «conditions standard» (1 000 N – 10 cycles) et conditions «sévères» (2 000 N – 50 cycles). Les résultats peuvent par exemple être comparés à la valeur limite de 300 g/m² utilisée pour les couches bitumineuses minces et peu bruyantes (AGT) dans le cahier des charges types flamand SB 250 (Vlaamse Overheid, Agentschap Wegen en Verkeer [AWV], 2021, Chapitre 14-5.5-2-2.1).

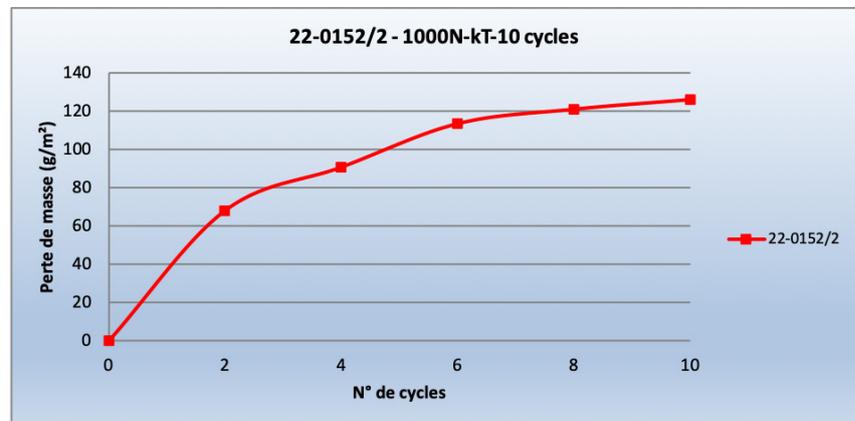


Figure 9 – Premiers essais de plumage réalisés sur des dalles en béton poreux (composition 4 sans polymère) et exemple de perte de masse observée

Les essais préliminaires ont ainsi montré qu'il est préférable de **ne tester que la partie supérieure** des **plaques d'essai confectionnées sur la table vibrante**, et que **l'essai dans les conditions les plus sévères (2000 N - 50 cycles) est le plus adapté** pour estimer la résistance au plumage des mélanges de béton poreux.

Les résultats finaux dans les conditions sévères sont présentés à la figure 10 et il en ressort que **toutes les compositions de béton poreux testées en laboratoire présentent une bonne résistance** au plumage, indépendamment de l'ajout ou non de l'adjuvant colloïdal.

En outre, dans le cadre de la validation in situ (voir plus bas), la sensibilité au plumage de deux mélanges commerciaux a également été testée. On a constaté que le mélange le plus performant présentait lui aussi une bonne résistance, de sorte qu'on ne s'attend pas à des problèmes de plumage sous l'influence de la circulation pour les mélanges de béton drainant, pour autant qu'ils soient exécutés selon les règles de l'art et dans un champ d'application correct.

En plus de la résistance au plumage et au gel-dégel, d'autres propriétés fonctionnelles peuvent être pertinentes en fonction de l'application prévue, notamment la planéité, la rugosité ou la résistance à l'usure. La rugosité (du point de vue de la sécurité) ne devrait normalement pas poser de problème. D'autre part, quelques mesures de planéité ont été effectuées sur un chantier à Uccle (voir plus bas).

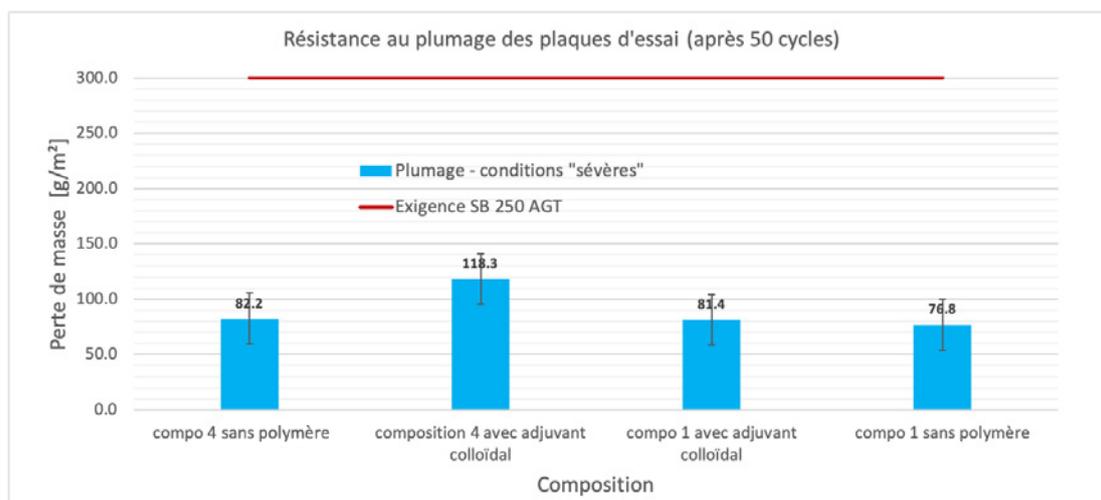


Figure 10 – Résultats des essais de plumage en termes de perte de masse cumulée: après 50 cycles (conditions «sévères») pour toutes les compositions de béton poreux testées en laboratoire

Validation in situ

Outre les essais en laboratoire, plusieurs chantiers avec du béton drainant ont également fait l'objet d'un suivi au moyen de différents essais performantiels pour valider et corrélérer les résultats obtenus en laboratoire (voir par exemple (Boonen et al., 2022)).

Prenons d'abord l'exemple d'une piste cyclable en béton drainant, construite à Uccle (chaussée d'Alseberg), où des échantillons de béton frais ont été prélevés au cours des différentes phases de mise en œuvre, en combinaison avec des carottages dans le revêtement (figure 11). Le compactage a été réalisé en deux étapes: premier compactage et épandage du matériau à l'aide d'un roller striker, puis compactage de la surépaisseur présente à l'aide de la plaque vibrante¹.

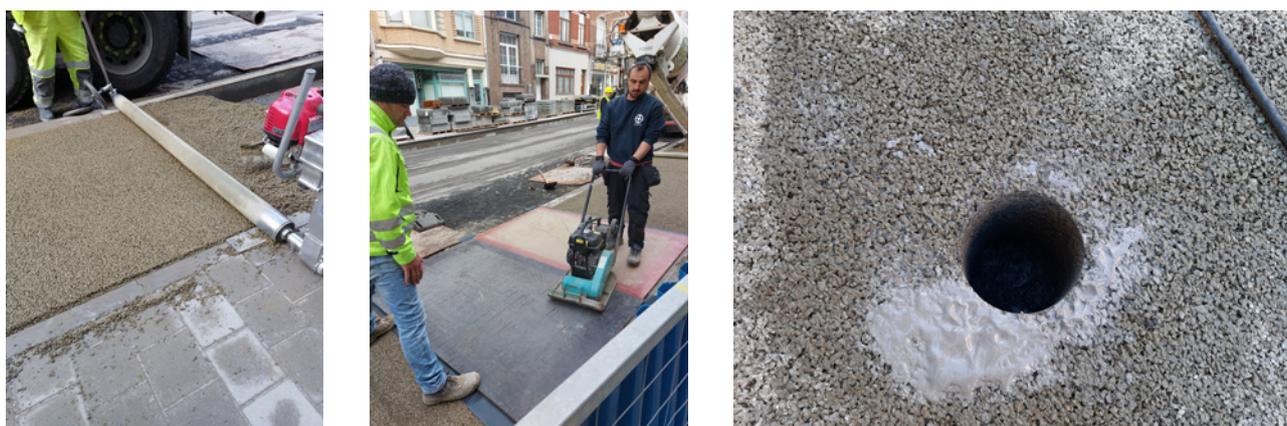


Figure 11 – Compactage d'un béton poreux pour piste cyclable à Uccle avec suivi au moyen d'essais en laboratoire sur le béton frais et de carottages dans le revêtement

1 En utilisant des lattes métalliques d'une épaisseur approximative de 1 cm sur les bordures lors de l'utilisation du rouleau

La comparaison des résultats pour la résistance à la compression et la perméabilité, obtenus, d'une part, sur des carottes provenant du revêtement lui-même et, d'autre part, via des éprouvettes confectionnées en laboratoire avec le compactage Proctor allégé, est illustrée à la figure 12.

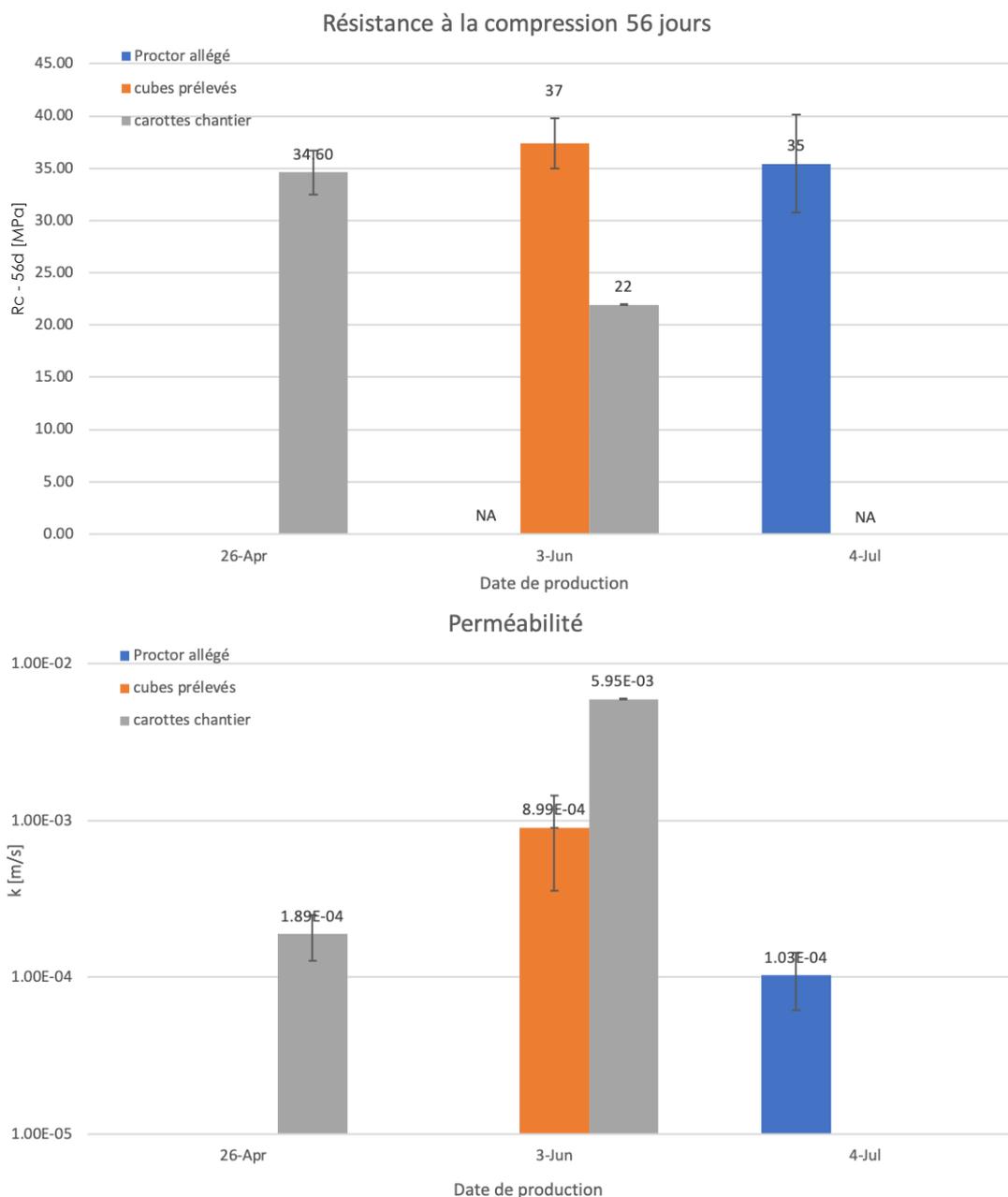


Figure 12 – Résultats pour le béton poreux durci de la piste cyclable à Uccle (laboratoire versus chantier)

La comparaison montre une diminution de la résistance à la compression et une augmentation de la perméabilité entre deux phases (26/4 et 3/6/2022) en raison d'un changement dans la formulation du béton. La diminution de la résistance à la compression s'accompagnait néanmoins d'une amélioration de la finition de surface, comme on a pu le constater sur place. Ensuite, des mesures de planéité ont été effectuées avec le profilomètre pour pistes cyclables (FPP) du CRR (Centre de recherches routières [CRR], 2023), qui ont confirmé ces observations.

Les résultats pour les éprouvettes confectionnées en laboratoire (via des cubes vibrés ou avec le Proctor allégé, à partir du béton frais échantillonné le jour de la mise en œuvre) donnent une résistance plus élevée (> 35 MPa) et une perméabilité plus faible (10^{-4} m/s) que les carottes obtenues pour le même matériau. D'autre part, les résultats pour le Proctor allégé du 4/7/2022 sont facilement comparables aux carottes du 26/4/2022. Enfin, malgré la variation parfois importante des résultats, on peut conclure que **pour toutes les «carottes du chantier» d'Uccle**:

- résistance à la compression moyenne $R_{c,avg} \geq 20$ MPa;
- perméabilité à l'eau moyenne $k_{avg} \geq 1,0 \cdot 10^{-4}$ m/s.

Pour certains chantiers, par exemple lors de la réalisation de planches d'essais avec du béton drainant à Gand (figure 13), les propriétés fonctionnelles ont également été étudiées, comme la résistance au plumage. Ici – contrairement aux mélanges de laboratoire – les essais de plumage n'ont pas été réalisés sur des éprouvettes rectangulaires, mais sur des carottes de diamètre supérieur (22 cm), qui ont ensuite été plâtrées pour permettre la fixation d'une plaque d'essai dans le dispositif de mesure (figure 13a). Les résultats moyens (pour trois carottes par mélange) sont illustrés à la figure 13b.

a)



b)

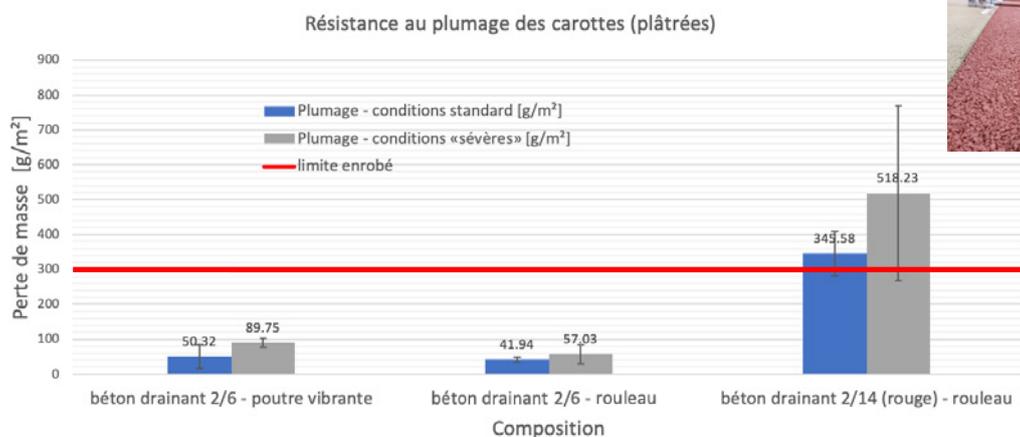


Figure 13 – Essais de plumage réalisés sur les éprouvettes de Gand: a) carottes plâtrées avant la création de la plaque d'essai; b) résultats moyens de la perte de masse en fonction du nombre maximal de cycles (conditions standard et sévères)

Les conditions d'essai plus sévères (cf. essais en laboratoire précédents) permettent une meilleure distinction de la résistance au plumage. Les résultats montrent clairement que le mélange de granulométrie plus faible ($D_{\max} = 6$ mm) présente une meilleure résistance au plumage que le béton plus grossier ($D_{\max} = 14$ mm), qui ne satisfait plus à la valeur limite pour les enrobés AGT (300 g/m^2). Il **semble** également que la **finition de la surface (avec une poutre ou un rouleau vibrant(e))** influence la résistance moyenne au plumage, mais la différence n'est pas très significative compte tenu de la dispersion.

Globalement, tous les résultats obtenus sur chantier (Boonen et al., 2021; 2022) ont également été analysés de manière plus approfondie afin d'étudier la corrélation entre le compactage en laboratoire (avec le Proctor allégé = PA, et/ou des cubes carottés) d'une part, et le compactage sur chantier (carottes prélevées dans le revêtement = «carottes»), d'autre part. Ceci est illustré à la figure 14, les lignes rouges discontinues correspondant aux exigences actuelles pour le béton **maigre drainant** ($R_{c,avg} \geq 13 \text{ MPa}$; $k_{ind} \geq 4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$). Les lignes rouges continues se réfèrent aux exigences potentielles pour **revêtements** en béton poreux ($R_{c,avg} \geq 20 \text{ MPa}$; $k_{avg} \geq 1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$). Les chantiers avec mise en oeuvre de béton maigre drainant sont ceux de Herzele et d'Uccle (comme fondation sous le pavage drainant). Les valeurs marquées d'un astérisque (*) concernent en outre des mesures de perméabilité sur des éprouvettes Proctor non carottées, dont la fiabilité peut être mise en doute (voir plus haut et [Boonen et al., 2022]).

Sur la base de tous ces résultats, nous pouvons affirmer que:

- le compactage selon le Proctor allégé (PA) reste le plus prometteur pour prédire les valeurs in situ, **en particulier dans le cas du béton maigre drainant**;
- les **mélanges de béton poreux pour couches de roulement** peuvent présenter de **grandes variations**² en fonction de la composition et des techniques de compactage utilisées;
- les **exigences actuelles pour le béton maigre drainant peuvent certainement être obtenues** avec un compactage approprié sur chantier;
- **il n'est pas toujours évident de savoir quelles méthodes de compactage ou quelles techniques de mise en oeuvre sont nécessaires pour atteindre certaines exigences performantielles.**

2 Le compactage Proctor allégé, par exemple, ne s'avère pas toujours applicable aux compositions de béton drainantes pour couches de roulement, généralement plus fines, qui donnent parfois des éprouvettes imperméables.

Résistance à la compression 28/56j - chantier/labo

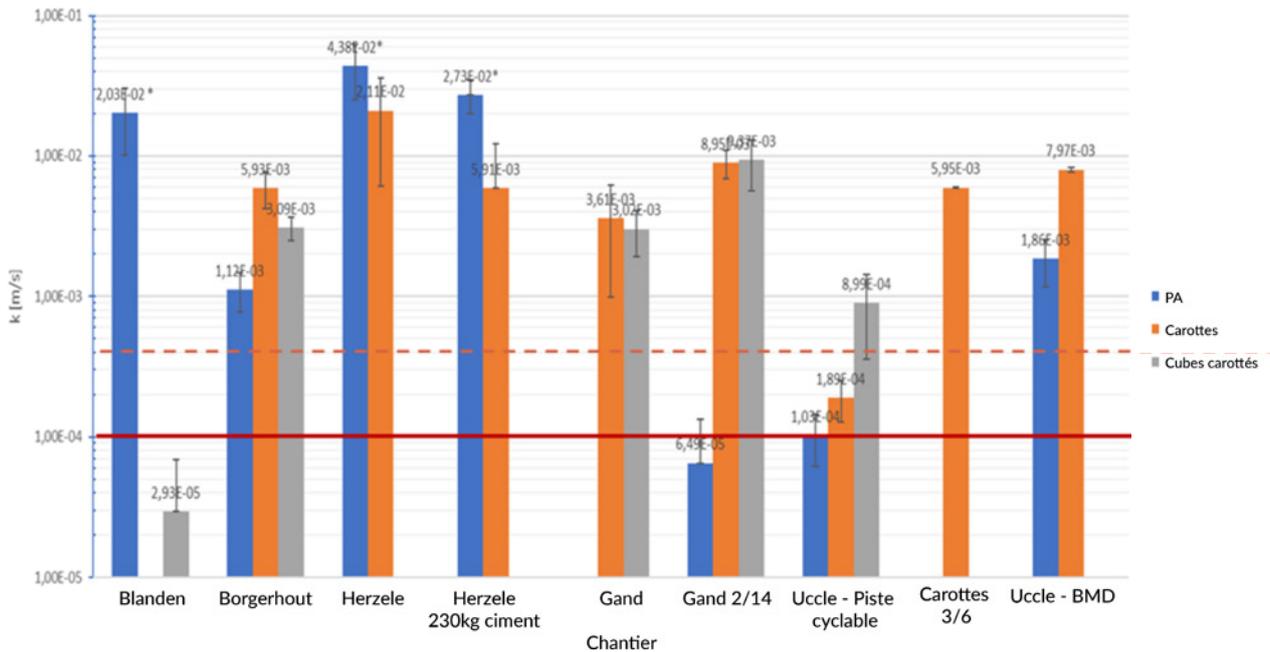
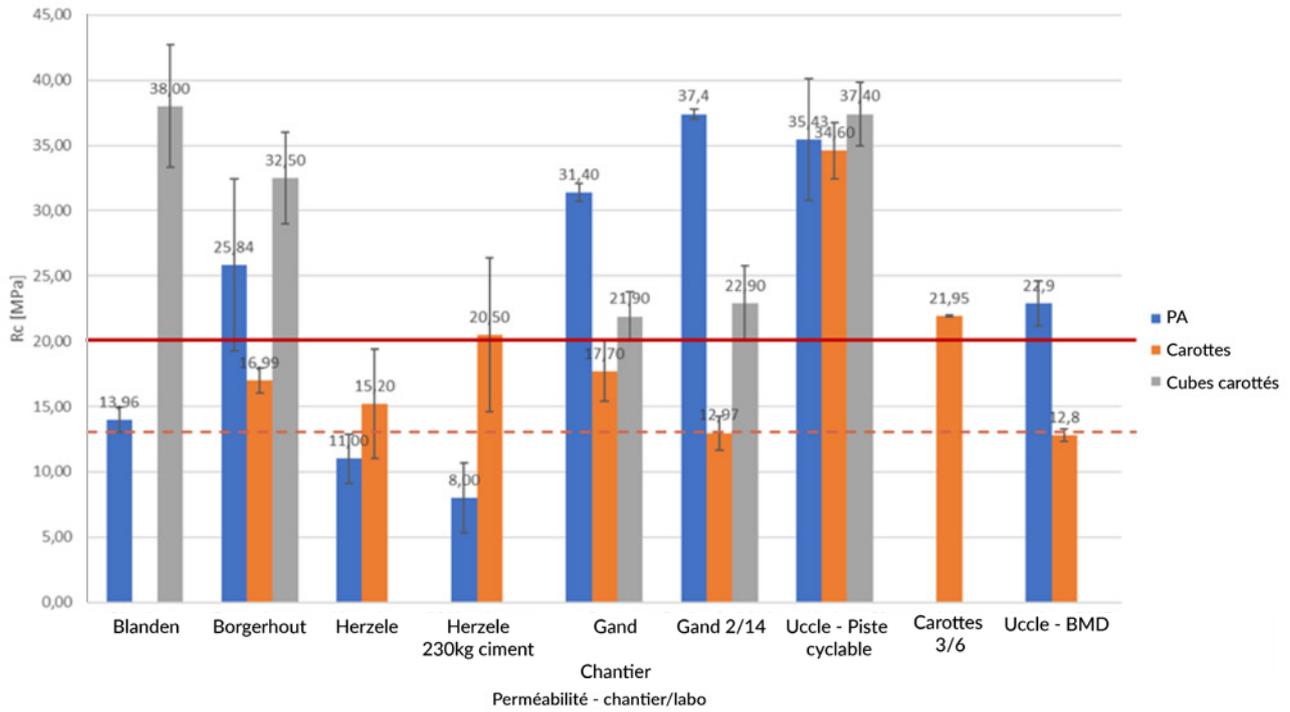


Figure 14 – Corrélation entre les résultats en laboratoire (PA ou cubes) et sur chantier (carottes) pour tous les chantiers suivis dans le projet Be-Drain: résistance à la compression (R_c - en haut) et perméabilité (k - en bas). Les lignes discontinues correspondent aux limites actuelles pour le béton maigre drainant ($R_{c,avg} \geq 13$ MPa ; $k_{ind} \geq 4 \cdot 10^{-4}$ m/s), les lignes continues correspondent aux limites potentielles pour le béton poreux dans le revêtement ($R_{c,avg} \geq 20$ MPa ; $k_{avg} \geq 1 \cdot 10^{-4}$ m/s); * = Proctor non carotté pour essais de perméabilité

Conclusions et perspectives

Le béton drainant (maigre ou non) est une solution prometteuse, s'inscrivant parfaitement dans le cadre d'une gestion durable et intégrale des eaux dans notre environnement urbain et bâti. La recherche prénormative Be-Drain nous a permis d'approfondir notre expérience par rapport à ce matériau innovant et, sur la base des résultats, de proposer des directives techniques additionnelles pour le béton poreux, afin d'étendre son champ d'application des fondations (le béton maigre drainant bien connu) aux couches de roulement et aux revêtements routiers. Les conclusions principales du projet, dans les différents domaines, sont synthétisées ci-dessous.

Optimisation en laboratoire

Les conclusions principales du projet sont les suivantes:

- Le compactage à l'aide du **Proctor allégé** semble la méthode la plus prometteuse pour prédire les performances du béton poreux et optimiser ses propriétés en laboratoire, en particulier pour le béton maigre drainant;
- Des méthodes d'essai pour déterminer la fluidité et l'**ouvrabilité** ont été mises au point:
 - L'essai Waltz (mesure de l'indice de serrage) avec un poids de 12 kg pour l'ouvrabilité;
 - Le «Proctor différé» donne une mesure du délai de maniabilité (au cas par cas);
- L'**impact** potentiel **des adjuvants ou additifs polymères** a été clarifié, tant pour le béton poreux frais que durci, avec une valeur ajoutée évidente pour l'adjuvant colloïdal étudié;
- Pour la méthode de détermination de la perméabilité en laboratoire (Service Public de Wallonie [SPW], Qualité & Construction, 2021; Vlaamse Overheid, 2021), il est préférable de limiter la pression de l'eau à $\Delta z \leq 4$ cm et de réaliser l'essai sur des carottes prélevées (113 mm) dans les éprouvettes Proctor.
- Quant aux **caractéristiques plus fonctionnelles**:
 - un premier élan a été donné à la mise au point d'une méthode d'essai pour déterminer la résistance aux cycles de gel-dégel en présence de sels de déverglaçage;
 - la méthode d'essai pour la détermination de la résistance au plumage utilisée pour les revêtements bitumineux en Belgique a été validée pour l'application aux revêtements en béton drainant.

Validation sur chantier

En ce qui concerne la corrélation entre les résultats obtenus en laboratoire et ceux obtenus sur chantier, le compactage PA semble toujours être le meilleur, malgré la **grande variabilité potentielle des mélanges de béton poreux** et le fait qu'il n'est pas toujours applicable aux compositions de béton drainant pour couches de roulement.

Cependant, il n'est (toujours) pas évident de savoir quelles méthodes et/ou techniques de compactage doivent être appliquées sur chantier pour atteindre certaines exigences performantielles visées in situ:

- pour le **béton maigre drainant**, les exigences actuelles semblent en principe réalisables avec des techniques d'exécution adaptées: $R_{c,avg} \geq 13$ MPa, $R_{c,ind} \geq 10$ MPa; $k_{ind} \geq 4,0 * 10^{-4}$ m/s;
- pour le **béton poreux pour revêtements routiers** – sous réserve de recherches plus approfondies – les exigences suivantes peuvent éventuellement être imposées en fonction de la charge de trafic:
 - $R_{c,avg} \geq 18$ ou 20 MPa; $R_{c,ind} \geq 15$ ou 17 MPa – $R_{t,sp} \geq 1,8$ ou 2,0 MPa³
 - $k_{avg} \geq 1,0 * 10^{-4}$ m/s; $k_{ind} \geq 5,0 * 10^{-5}$ m/s

3 La valeur de la résistance à la traction par fendage est basée sur la corrélation générale qui semble exister entre la résistance à la compression et la résistance à la traction par fendage pour le béton poreux, telle qu'obtenue à partir des résultats de Be-Drain; il semble que la règle des 10 % pour le béton classique soit également validée/confirmée pour le béton drainant.

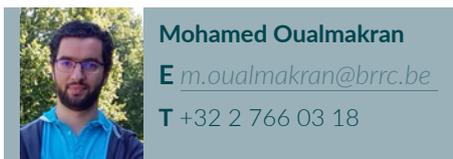
Quoi qu'il en soit, il est clair que des **recherches additionnelles** seront nécessaires à **l'avenir**, y compris le **suivi de chantiers pilotes supplémentaires** (figure 15) afin d'étudier un certain nombre de points plus en détail et d'encourager l'application de béton drainant. L'accent devrait être mis sur les propriétés fonctionnelles des revêtements en béton drainant (y compris la planéité et le confort pour l'utilisateur) et sur la validation des résultats de laboratoire par des mesures in situ, ainsi que sur la durabilité à plus long terme, tant en termes de propriétés mécaniques que sur le plan hydraulique.



Figure 15 – Mise en oeuvre récente de béton drainant sur une piste cyclable à Neder-Over-Heembeek, à l'aide d'un finisseur, puis d'un compacteur à rouleau

Remerciements

Les auteurs remercient le SPF Économie et le NBN pour le soutien financier du projet Be-Drain, le partenaire de recherche CRIC-OCCN pour la collaboration constructive, Febelcem pour le suivi de la recherche ainsi que les différentes parties impliquées dans les chantiers pilotes et/ou dans la fourniture de matériaux pour la recherche en laboratoire (notamment Holcim, Interbeton, CBR, CCB, Sika Belgium, Roos Groep, Superbeton, Willemen Infra, Colas Belgium, O.B.B.C, Wegenwerken De Moor, Bruxelles Mobilité, Aquafin, Frédéric Fontaine).



Bibliographie

Boonen, E., Van der Wielen, A. & Oualmakran, M. (2021). Le béton (maigre) drainant pour des revêtements routiers durables: Premiers résultats du projet « Be-Drain ». Newsletter CRR, (04). <https://brrc.be/fr/expertise/expertise-aperçu/beton-maigre-drainant-revetements-routiers-durables-premiers-resultats>

Boonen, E., Van der Wielen, A. & Oualmakran, M. (2022). Projet prénormatif belge Be-Drain: Béton drainant à l'étude pour des revêtements routiers durables. *Revue générale des routes et de l'aménagement (RGRA)*, (991), 50-55.

Bureau de Normalisation (NBN). (2004). *Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques. Partie 45: Méthodes d'essai pour la détermination du délai de maniabilité* (NBN EN 13286-45). https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/detail?p40_id=199554&p40_language_code=fr&p40_detail_id=26105&session=19043336547082

Bureau de Normalisation (NBN). (2010). *Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques. Partie 2: Méthodes d'essai de détermination en laboratoire de la masse volumique de référence et de la teneur en eau: Compactage Proctor* (NBN EN 13286-2). https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/detail?p40_id=199562&p40_language_code=fr&p40_detail_id=61581&session=19043336547082

Bureau de Normalisation (NBN). (2016). *Essais sur béton durci. Partie 9: Résistance au gel dégel-dégel en présence de sels de déverglaçage (écaillage)*(CEN/TS 12390-9). https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/detail?p40_id=212805&p40_language_code=fr&p40_detail_id=79363&session=19043336547082

Bureau de Normalisation (NBN). (2018). *Mélanges bitumineux: Méthodes d'essai. Partie 50: Résistance aux arrachements superficiels* (CEN/TS 12697-50). https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/detail?p40_id=225446&p40_language_code=fr&p40_detail_id=83569&session=19043336547082

Bureau de Normalisation (NBN). (2019). *Essais pour béton frais. Partie 4: Indice de serrage* (NBN EN 12350-4). https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/detail?p40_id=222380&p40_language_code=fr&p40_detail_id=90093&session=19043336547082

- Centre de Recherches Routières (CRR). (2023). Instruments pour les gestionnaires routiers. Fiche 3: FPP: Mesure de l'uni longitudinal des pistes cyclables (*Synthèse CRR No. SF 48, rév. 2, fiche 3*). <https://brrc.be/fr/expertise/expertise-aperçu/fpp-mesure-luni-longitudinal-pistes-cyclables>
- Henderson, V. (2012). *Evaluation of the performance of pervious concrete pavement in the Canadian climate* [Doctoral thesis]. University of Waterloo, Ontario, Canada. <https://uwspace.uwaterloo.ca/handle/10012/6686>
- Organisme Impartial de Contrôle de Produits pour la Construction (COPRO). (2019). *Celebrating 35 years on the road: Rapport d'activités 2018*. <https://www.copro.eu/fr/rapport-dactivites>
- Service Public de Wallonie (SPW), Qualité & Construction. (2021). *Cahier des charges type Qualiroutes* (Version 2021 consolidée [et ses adaptations ultérieures]). http://qc.spw.wallonie.be/fr/qualiroutes/frame.jsp?index_cctquali.html
- Vlaamse Overheid, Agentschap Wegen en Verkeer (AWV). (2021). *Standaardbestek 250 voor de wegenbouw* (version 4.1a). https://wegenenverkeer.be/zakelijk/documenten?search_api_fulltext_1=%22standaardbestek%20250%20versie%204.1a%22&documents%5B0%5D=type_document%3Astandaardbestek